مطالعه‌ی تجربی کاربرد سیستم کنترلی غیرفعالTMDدر کاهش ارتعاشات ساختمان‌ها در برابر زلزله★

«یادداشت پژوهشی»

سعید پورزینلی[۱] نصرت‌اله فلاح[۲] موسی اکبری آقبلاغ[۳]

چکیده *در این تحقیق، ابتدا مشخصات سازه‌ای مدل سه بعدییک ساختمان اسکلت فلزیچهار طبقه با مقیاس ۱:۱۲ از چندین روش تعیین می‌گردد. اندازه‌گیری میرایی‌های مودال و اشکال مودی بروش جاروی فرکانسی صورت می‌گیرد و مقادیر بهینه‌ی پارامترهای مختلف TMD با استفاده ازروش آزمون و خطا به دست می‌آید. سپس،TMD مربوط ساخته شده و در تراز بام نصب می‌شود و سازه تحت تحریک هارمونیک پایه بر روی میز لرزه مورد آزمایش قرار می‌گیرد.اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی حاکی ازعملکرد بسیار مناسب سیستم کنترلی طراحی شده در تحریک‌های هارمونیکی پایه، با فرکانسی برابر با فرکانس غالب سازه‌ی اصلیمی‌باشد.برای بررسی عملکرد سیستم کنترلی بهینه شده برای تحریک غیر هارمونیک پایه، پاسخ سیستم تحت تحریک ۲۳ زلزله‌ی داخلی و خارجی با محتواهای فرکانسی متفاوت، به صورت تحلیلی نیز محاسبه شده است.*

واژه‌های کلیدی سیستم کنترلی میراگر جرمی همساز (TMD) ، تحریک لرزه‌ای ، مطالعه‌ی تجربی، تحریک هارمونیک پایه.

Experimental Analysis of the TMD Control of Building Vibrations against Earthquake Excitations

S.Pourzeynali N. Fallah M. Akbari A.

Abstract *Basic dynamic characteristics of a 1:12 scaled experimental model of a 4 stories 3-D steel frame are obtained using different methods. The frequency sweep method is used to calculate the modal damping ratio and mode shapes of the frame. The optimal values of the TMD different parameters are evaluated using try and error method. Then the associated TMD system is constructed and installed on the top story andthe model is tested under support harmonic excitation.The experimentally measured results of the model frame under resonant harmonic support excitationshow the significant effectiveness of the proposed TMD system in reducing the model frame response.The above model is also analytically examined under 23 world-wide earthquake accelerogrames with different level of frequency content.*

Keywords TMD Control, Earthquake excitation, Frequency Content, Harmonic excitation.

★تاریخ دریافت مقاله ۸۹/۹/۱۰ و تاریخ پذیرش آن ۹۱/۷/۱۵ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول، دانشیار گروه عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان.

(۲) دانشیار گروه عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان.

(۳) کارشناس ارشد سازه، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان.

مقدمه

در دهه‌های اخیر کـاهش پاسـخ سـازه‌هـا تحـت تـأثیر نیروهای دینامیکی موضوع عنوان بسیاری از تحقیقـات شدهو تعداد زیادی از مفاهیم کنترل به ایـن منظـور در سازه‌ها مورد توجه قـرارگرفتـه‌اسـت [1]. بطـور کلـی سیستم‌های کنترل ارتعاشـات سـازه‌ای را مـی‌تـوان بـه چهار دسته‌ی عمده تقسیم کرد: کنترل غیرفعال، کنتـرل فعال، کنترل نیمه‌فعال و کنترل مرکب.

کنترل غیرفعال در سازه‌ها بدون صرف هیچ‌گونـه انرژی خـارجی بـرای کـاهش ارتعـاش سـازه اسـتفاده می‌شود. جرم و میراگر تنظیم شونده (TMD) یکـی از سیستم‌های کنترل غیرفعال می باشد که در آن یک جرم m توسط یک فنر و میراگر ویسکوز بـه سـازه ضـمیمه می‌شود. به‌طور عمومی فرکـانس‌هـای طبیعـی سیسـتم TMDدر نزدیکی یکی از فرکـانس‌هـای طبیعـی سـازه تنظیم می‌شود که معمولاً این فرکانس، فرکانس موداول سازه می‌باشـد. در نتیجـه ارتعـاش سـازه‌ی اصـلی بـه موجب ارتعاش TMDدر رزونانس مستهلک مـی‌شـود. هدف از به‌کارگیری یک میراگر جرمی تنظیم شونده در یک سازه کـاهش تقاضـای اتـلاف انـرژی در اعضـای سازه‌ی اصلی تحت اثر نیروهای خارجی است. در ایـن حالـت ایـن کـاهش تقاضـا توسـط انتقـال مقـداری از انرژی‌ورودی به میراگر جرمی تنظـیم شـونده صـورت می‌گیرد. از زمان ابداع سیستم TMD تا کنون تحقیقـات متعددی در این مورد صورت گرفتـه و آزمـایش هـای ویژه‌ای در امر کنترل ارتعاشات تحت انواع بارها انجام پذیرفته است.

در یکی از این تحقیقـات، تسـای حـل کلاسـیک سیستم اولیه‌ی میرا شده را گسترش داد و با اسـتفاده از منحنـی‌هـایی کـه بـر فرمـول‌هـا منطبـق شـده بودنـد پارامترهـای TMD را بـه‌صـورت بهینـه بـه‌دسـت آورد.دن‌هارتـگ و اورماندرویـد در سـال ۱۹۲۸ ابتـدا تئوری جاذب‌هـای دینـامیکی ارتعاشـی را بـا و بـدون میرایی برای یک سیستم اصلی نامیرا بررسـی و اصـول اساسی در روش انتخاب درست پارامترهای جـاذب را تعیین کردند [2]. مطالعه برعملکرد لـرزه‌ای TMD هـا توسط ویلاورد [3,4]، مارتین [5] و کویومـا [6] ادامـه پیدا کرد و مشاهده شد که به‌تـرین کـارآیی TMD هـا هنگامی است که اولین دو مود سیستم مرکـب سـازه و میراگر، تقریباً نسبت میرایی یکسانی با متوسـط نسـبت میرایی سازه و TMD داشنه باشد.

سیستم کنترلیTMD با وجـود آسـانی اسـتفاده و ارزانی قابـل توجـه آن، دارای قابلیـت اعتمـاد متوسـط است و به خوبی می‌توانـد ارتعاشـات نامناسـب بـاد و بارهای هارمونیک را کنترل نماید. امـا تحـت تحریـک زلزله، که یک پدیده تصادفی است وکـاملاً بسـتگی بـه مشخصات حرکت زمین دارد، برای زلزله‌های با پهنـای باند باریک واستمرار طـولانی نتیجـه‌بخـش اسـت [7]. سادک برای بـه‌دسـت آوردن پارامترهـای بهینـه TMD برای دستیابی به بیشترین کاهش در پاسخ سازه هنگـام تحریک زلزله، ضرایبی را برای بهبود پارامترها وروابـط ارائه شده توسط ویـلاورد پیشـنهاد مـی‌کنـد کـه درآن میرایی‌های دو مود اول ارتعاش با هـم برابـر و هـر دو مقداری بزرگ‌تـر از میـانگین میرایـی TMD و میرایـی سازه دارند [8].

با توجه به تحقیقات وسیعی که به‌صورت تحلیلی در زمینه‌ی سیستم‌های کنترل صورت گرفته، لزوم انجام تحقیقی آزمایشگاهی که به‌کمک آن بتوان اصـول ارائـه شده در تئـوری بـرای کنتـرل لـرزه‌ای سـازه‌هـا را بـه مرحله‌ی اجرا درآورد و به‌صورت عینی عملکرد آن‌هـا را مورد بررسی قرار داد به شدت احساس می‌شود، چرا که محققان بسیاری روش‌های تئوری کنترل سازه‌هـا را به‌خوبی پیش برده‌اند اما هنوز این روش‌ها در مرحله‌ی نظری می‌باشند و جای خالی آزمایش هایی کـه بتوانـد این دانش را به سمت بخش‌های صـنعتی هـدایت کنـد کاملاً محسوس است.

در تحقیق حاضر، به مطالعه‌ی آزمایشـگاهی مـدل سه بعدی یک قاب چهار طبقه با اسکلت فلزی پرداخته

می‌شود که به وسیله‌ی میز لرزه‌ی کوچکی که به این منظور طراحی و ساخته شده است، به‌صورت هارمونیک تحریک می‌گردد.در ضمن، بررسی لرزه‌ای این قاب تحت اثرشتاب نگاشت زلزله‌های مختلف به‌صورت نظری و تحلیلی نیز انجام گردیده است. در ادامه، نتایج مطالعات انجام گرفته برای به‌دست آوردن مشخصات واقعی مدل و پارامترهای بهینه‌ی سیستم، تحت تحریک هارمونیک و هم‌چنین تحت تحریک شتاب‌نگاشت‌های مربوط به ۱۲ زلزله‌ی خارجی و ۱۱ زلزله‌ی داخلی، که با محتواهای فرکانسی مختلف انتخاب شده بودند، آمده است. در ضمن، از آن‌جائی‌که مطالعات عددی و نظری فراوانی در سطح بین المللی براینگونه سیستم‌های کنترلی صورت گرفته است، در مقاله‌ی حاضر سعی شده است که به این بخش کم‌تر پرداخته شود. در مقابل، چون نتایج تحقیقات آزمایشگاهی در این مورد در کشور ما کم‌تر منتشر شده است لذا در این مقاله تلاش شده تا بیش‌تر بر مباحث آزمایشگاهی و نتایج آن تأکید گردد.

اصول پایه

شکل (۱) یک سیستم یک درجه آزادی (SDOF) را نشان می‌دهد که یک سیستم TMD نیز بر روی آن نصب شده است. برای سیستم مرکب سازه–TMD معادلات حرکت را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$M\ddot{y}(t)+C\dot{y}(t)+Ky(t)=c\dot{z}(t)+kz(t)+f(t) \qquad (۱)$$

$$m\ddot{z}(t)+C\dot{z}(t)+ky(t)=-m\ddot{y}(t)+g(t) \qquad (۲)$$

که در آن y(t) تغییر مکان سیستم سازه‌ای نسبت به پایه‌ی آن، و z(t) تغییر مکان نسبی TMD نسبت به سازه است. ضرایب میرایی و سختی با علامت c و k برای TMD، و C و K برای سیستم سازه اصلی است. f(t) نیروی خارجی وارد بر سازه‌ی اصلی می‌باشد در حالی‌که g(t) نیروی وارد بر جرم TMD ، که برای تحریک باد برابر با صفر و در حالت بارگذاری زمین‌لرزه برابر با m_0 f(t) است که m_0=m/M می‌باشد.

حاصل جمع معادلات بالا منجر به عبارت زیر می‌شود:

$$(M+m)\ddot{y}(t)+C\dot{y}(t)+Ky(t)=f(t)+g(t)-m\ddot{z}(t) \qquad (۳)$$

مطالعه‌ی آزمایشگاهی

انتخاب مدل

به‌دلیل نیاز به خطی بودن رفتار سازه و با توجه به شرایط اقتصادی، قابلیت انجام کار، نوع مصالح و صورت مسأله‌ی مورد مطالعه، مدلی با مقیاس کوچک (کوچک‌تر از ۱:٤) انتخاب گردید. برای انتخاب تعداد طبقات مدل، با توجه به این‌که در انجام مطالعات تحلیلی، مدل‌سازی صورت گرفته باید معرف خوبی از رفتار مدل واقعی سازه باشد و جواب‌های به‌دست آمده از مدل ریاضی هم‌خوانی مناسبی با نتایج به‌دست آمده از آزمایش دینامیکی داشته باشد، لذا لازم است که مدل ساخته شده از عمومیت کافی برخوردار باشد؛ یعنی تمام یا حتی‌الامکان اکثر متغیرهای مطرح در مسأله را در خود داشته باشد. عموماً متغیرهای مطرح در آزمایش‌های دینامیکی و لرزه‌ای عبارتند از سختی، جرم طبقات، فرکانس، میرایی مودها و اشکال مودی. بنابراین، با افزایش تعداد مودها و یا به عبارت دیگر تعداد طبقات، شرایط مناسب‌تری برای مقایسه بین نتایج تحلیل عددی و نتایج آزمایش فراهم می‌شود. برای رسیدن به این هدف، بهتر است که مدل انتخابی دارای حداقل سه طبقه باشد. علاوه بر آن، همان‌طور که در بخش مقدمه به آن اشاره شد، سیستم کنترل TMD بر سازه‌های با درجه آزادی بالاتر عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. اما ساخت مدلی با تعداد درجات آزادی انتقالی بالا (تعداد طبقات بیش‌تر)، نیاز به ابزار و امکانات بیش‌تری برای تولید و کنترل نیروهای ارتعاشی دارد هم‌چنین وسایل اندازه‌گیری با

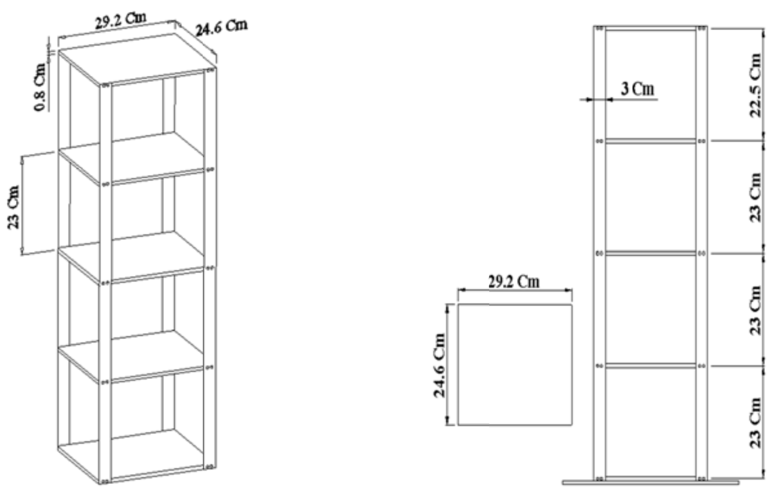
مشخصات بالاتری برای سنجش پاسخ‌های سازه، به‌خصوص در هنگام تشدید مورد نیاز است. لذا با توجه به این مقدمه، مدل مورد بررسی چهار طبقه انتخاب شده است.

از آن‌جاکه مصالح در دسترس مختلفی برای ساخت مدل موجود می‌باشد، برای داشتن مدلی با شکل‌پذیری بالا که بتوان به‌خوبی تغییرشکل‌ها و مودهای ارتعاشی آن را نمایش بدهد و هم‌چنین از لحاظ اجرایی دارای قابلیت تعمیر و تعویض قطعات باشد، جنس مصالح آن از فولاد انتخاب شد و اتصالات آن به‌صورت پیچی درنظر گرفته شد. به‌منظور بررسی و مدل‌سازی دوبعدی مدل و جلوگیری از وابسته شدن معادلات حرکت در دو جهت مختلف به یکدیگر، پلان مدل متقارن و بدون خروج از مرکزیت بین جرم و سختی در نظر گرفته شد تا در سازه لنگرهای پیچشی به‌وجود نیاید.

با توجه به این نسبت ابعادی، وزن طبقات مدل که شامل وزن صفحه‌ی کف، وزن ستون در تراز طبقه شامل نیمی از ارتفاع طبقه‌ی بالا ونیمی از ستون طبقه‌ی پایین، وزن پیچ‌های اتصال ستون به صفحه‌ی کف و وزن قطعات تقویتی ستون در محل اتصال می‌باشد، به شرح زیر تعیین گردید که در آن m_i جرم طبقه iام می‌باشد:

$$m_1=4.94\ kg\ ,\ m_2=4.925\ kg\ ,$$
$$m_3=4.93\ kg\ ,\ m_4=5.53\ kg \qquad (٤)$$

ستون‌ها به‌صورت یکپارچه و با سطح مقطع ۳×۰/۲ سانتی‌متر و به ارتفاع کل ۹۲/٤ سانتی‌متر می‌باشند. ممان اینرسی این مقطع حول محور ضعیف آن برابر $I_m=2\times10^{-3}cm^4$ می‌باشد. علت انتخاب این نوع مقطع، که ممان اینرسی آن در دو جهت اختلاف بسیار زیادی با یکدیگر دارند، این است که بتوان تغییرمکان‌های ایجاد شده در سازه را کاملا به‌فرم دوبعدی درنظر گرفت و حتی اگر عدم تقارن اتفاقی در سازه به‌دلیل تفاوت در سختی اتصالات وجود داشته باشد، به دلیل اختلاف زیاد سختی‌ها در دو جهت بتوان از اثر آن صرف نظر کرد. صفحات کف این قاب از جنس فولاد و دارای ابعاد ۲٤/٦×۲۹/۲ سانتی‌متر و ضخامت ۸ میلی‌متر می‌باشد. مشخصات مدل فوق در شکل (۲) آمده است.



الف) مدل قاب چهار طبقه　　ب) ارتفاع طبقات مختلف و صفحه‌ی فلزی کف

شکل ۲ مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق

محاسبه‌ی سختی استاتیکی قاب

برای تعیین سختی قاب، روش‌های متعددی موجود است. ساده‌ترین روش، استفاده از روابط تحلیلی مثل روش شیب- افت برای تعیین سختی طبقات می‌باشد. اما این روش‌ها به‌دلیل این‌که نیاز به انجام فرضیات ساده کننده بسیار زیادی دارند، در کارهای آزمایشگاهی که نیازمند دقت بالایی در محاسبات هستند، مناسب به‌نظر نمی‌رسند. روش دیگر محاسبه‌ی سختی به‌صورت آزمایش استاتیکی و استفاده از روش نرمی می‌باشد. بدین منظور، بار جانبی در تراز بام به‌صورت استاتیکی اعمال می‌شود و به‌وسیله‌ی گیج‌های ساعتی نصب شده روی پایه‌ی ثابت، مقادیر جابه‌جایی طبقات اندازه‌گیری می‌گردد. در این‌حالت با فرض عملکرد قاب به‌صورت برشی، می‌توان سختی قاب را به‌صورت آزمایشگاهی تعیین نمود که در این تحقیق، از این روش برای تعیین ماتریس سختی قاب استفاده گردید.

در نهایت سختی طبقات و ماتریس سختی قاب در جهت ضعیف آن به‌صورت زیر تعیین گردید:

$K_1=19.565\ {}^{kN}/_{m}$, $K_2=19.802\ {}^{kN}/_{m}$

$K_3=19.811\ {}^{kN}/_{m}$, $K_4=25.431\ {}^{kN}/_{m}$

$$K=\begin{bmatrix}39366.5 & -19801.5 & 0 & 0\\ & 39612.2 & -19810.7 & 0\\ & & 45241.3 & -25430.6\\ & sym & & 25430.6\end{bmatrix}(N/M)$$

(۵)

تعیین فرکانس‌های طبیعی سیستم

با داشتن مقادیر سختی و جرم طبقات و از آن‌جا با تعیین ماتریس‌های سختی و جرم قاب، می‌توان با حل معادله‌ی مقدار ویژه و بردار ویژه، فرکانس‌های طبیعی سیستم را تعیین کرد که عبارتند از:

$$Freq.=[3.42\ ,\ 10.25\ ,\ 16.07\ ,\ 19.47]\ Hz \qquad (٦)$$

روش دیگر برای تعیین فرکانس‌های طبیعی سیستم استفاده از روش جاروی فرکانسی است.در این روش، سازه تحت ارتعاش اجباری هارمونیک با محتوای فرکانسی در یک بازه‌ی مناسب که شامل تمام فرکانس‌های طبیعی سیستم باشد، قرار می‌گیرد و با گام‌های مناسبی که خطای اندازه‌گیری فرکانس را تعیین می‌کند، پاسخ حداکثر سیستم در هر گام در حالت پایدار ثبت می‌شود. نتایج پس از دوبار آزمایش و متوسط‌گیری بین نتایج به‌دست آمده از داده‌های تمام طبقات به‌صورت زیر می‌باشد:

$$Freq.=[3.026\ ,\ 9.4923,\ 15.5265,\ 20.0359]Hz \qquad (٧)$$

به‌طوریکه از نتایج بر می‌آید، دو روش فوق با یکدیگر انطباق خوبی دارند.

محاسبه‌ی میرایی سازه

ساده‌ترین روش محاسبه‌ی میرایی، استفاده از روش کاهش دامنه می‌باشد. بدین منظور، با اعمال یک تغییرشکل اولیه، مشابه مود اول، و ایجاد ارتعاش آزاد در سیستم، می‌توان مقادیر حداکثر جابه‌جایی‌ها در هر سیکل را اندازه‌گیریو با محاسبه‌ی کاهش لگاریتمی آن، میرایی مود اول را به‌عنوان مود غالب، با تقریب مناسبی تعیین کرد. با اندازه‌گیری میرایی بدین روش مقدار ξ_1=۳/۳٪ به‌دست می‌آید. با فرض تساوی میرایی دو مود اول سازه و استفاده از روش رایله برای تعیین ماتریس میرایی[9]، ضرایب تناسب a_0 و b_0 به شرح زیر به‌دست می‌آیند:

$$\begin{Bmatrix}a_0\\ b_0\end{Bmatrix}=\frac{2\omega_n\omega_m}{\omega_n^2-\omega_m^2}\begin{bmatrix}\omega_n & -\omega_m\\ -1/\omega_n & 1/\omega_m\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\xi_m\\ \xi_n\end{Bmatrix}$$

(۸)

که با استفاده از مقادیر نسبت میرایی و فرکانس مودهای اول و دوم داریم:

$a_0=1.06557$ و $b_0=7.67442e-4$ (۹)

که از آن‌جا با استفاده از مقادیر ماتریس‌های جرم و سختی محاسبه شده در بالا، ماتریس میرایی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$C = a_0 M + b_0 K = \begin{bmatrix} 25.41 & -19.52 & 0 & 0 \\ & 39.97 & -15.20 & 0 \\ & & 35.64 & -15.20 \\ & \text{Sym} & & 35.48 \end{bmatrix}$$

(۱۰)

حل معادلات تحت اثر تحریک تکیه‌گاهی

معادله‌یحرکت سیستم جرم و فنر و دمپر به‌عنوان یک سیستم یک درجه آزادی به‌صورت $m\ddot{x}+c\dot{x}+kx=-m\ddot{u}_g$ و معادله‌ی حرکت سیستم با چند درجه آزادی به‌صورت

$$[M]\{\ddot{x}\}+[C]\{\dot{x}\}+[K]\{x\}=-[M]\{r\}\ddot{u}_g \qquad (۱۱)$$

می‌باشد که با فرض تحریک پایه به‌صورت هارمونیک $u_g = u_{0_g}\text{Sin}\Omega t$، معادله‌ی حرکت مدل در فضای حالت به شکل زیر خواهد شد[10]:

$$\dot{X} = AX + Bu \quad , \quad Y = EX + Du \qquad (۱۲)$$

که در آن:

$$\dot{X}=\begin{Bmatrix}\{\dot{x}\}\\\{\ddot{x}\}\end{Bmatrix},\ X=\begin{Bmatrix}\{x\}\\\{\dot{x}\}\end{Bmatrix},$$

$$A=\begin{bmatrix}[0] & [1]\\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C]\end{bmatrix},$$

$$B=\begin{Bmatrix}[0]\\ [1]\end{Bmatrix},\ E=([1]\ [0]),\ D=[0],\ Y=\{x\},$$

$$\{u\}=\{r\}\Omega^2 u_{0_g}\text{Sin}\,\Omega t$$

(۱۳)

با تعریف مقادیر جرم ، سختی، و میرایی TMD به‌صورت زیر [۱۱]:

$$m_T = m_0 \times m_{building},\ k_T = m_T(\beta\omega_1)^2,$$
$$c_T = 2\xi_T\sqrt{m_T k_T}$$

(۱٤)

بهینه‌سازی متغیرهای سیستم TMD

در این تحقیق، بهینه‌سازی با استفاده از روش آزمون و خطا صورت گرفته که در ادامه نتایج حاصل ارائه شده است. از آن‌جایی‌که هرچه نسبت جرمی بیش‌تر شود کاهش پاسخ‌های سازه نیز بیش‌تر می‌گردد، [2] لذا نسبت جرمی عموماً با در نظر گرفتن محدودیت‌های اجرایی انتخاب می‌گردد. علی‌رغم این،با رسم مقادیر بهینه β و ξ برای نسبت‌های جرمی مختلف، مشاهده می‌شود که در نمودار $R\text{-}m_0$ برای m_0 های بیش از ٤ درصد، افزایش نسبت جرمی تأثیر کم‌تری در کاهش پاسخ طبقه‌ی بام دارد (شکل ۳) و براین اساس نسبت جرمی بهینه برابر با ٤ درصد انتخاب می‌گردد.نمودار معیار عملکرد پاسخ طبقه‌ی بام به‌ازای تغییرات ورودی‌های دو متغیر دیگر در شکل (٤) آمده است. براساس این نمودارها می‌توان چنین نتیجه گرفت که با کاهش میرایی TMD، عملکرد بهتری از آن در برابر تحریکات بار هارمونیک انتظار می‌رود. اما بازه‌ی تغییرات مطلوب برای نسبت فرکانسی β بسیار به یکدیگر نزدیک می‌باشد به‌طوریکه برای میرایی ۱٪ ضریب β برابر ۰/۹۵، و برای نسبت میرایی ۱۳٪ برابر ۰/۹۳ می‌باشد و در میرایی‌های نزدیک صفر میزان حساسیت پاسخ‌ها نسبت به مقدار β بیش‌تر می‌شود. همان‌طور که نمودارها نشان می‌دهند، کم‌ترین پاسخ تغییرمکان طبقه‌ی بام به‌ازای میرایی صفر به‌دست می‌آید. در این حالت حداقل مقدار R=۰/۱۷ به‌ازای β=۰/۹٦ به‌دست می‌آید که به معنی کاهش ۸۳/۰٦۷ درصدی پاسخ‌ها می‌باشد.

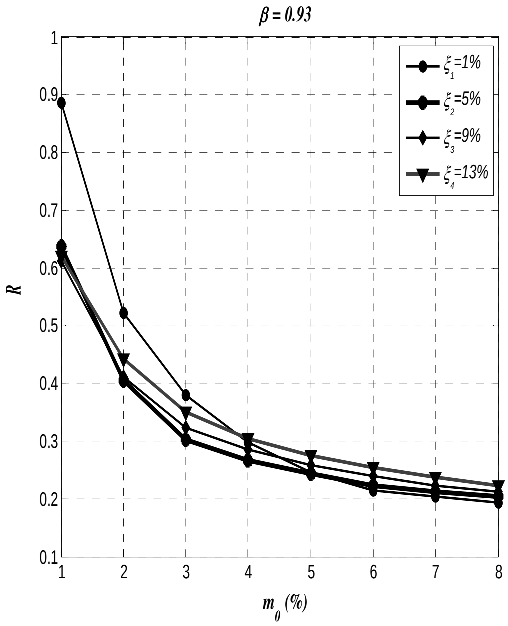
ساخت سیستم TMD

با توجه به عدم نیاز به میرایی (در تحریک هارمونیک

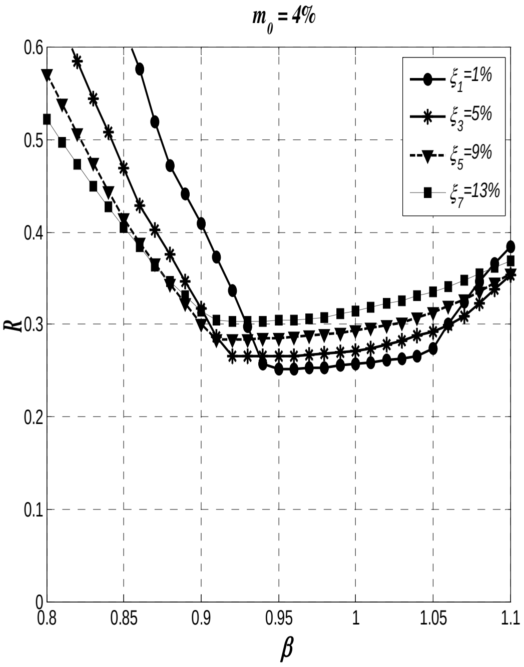
پایه) و این‌که نمی‌توان میرایی سیستم TMD را کم‌تر از مقـدار میرایـی ذاتـی آن در نظـر گرفـت و هـم‌چنـین حساسیت کم مقادیر β در میرایـی‌هـای بـالاتر، مقـادیر متغیرهای TMD به‌صورت زیر انتخاب می‌گردند:

$$m_T = m_0 \times m_{building} = 0.04 \times 19.544 = 0.782 \ (kg)$$
$$k_T = m_T(\beta\omega_1)^2 = 0.782 \times (0.94 \times 19.013)^2 = 249.70 \ (N/m)$$
(۱٦)

سیستم TMD مورد استفاده در این تحقیق، مطابق شکل (۵) به‌صورت یک ارابه طراحی شـد کـه در هـر طرف آن دو فنر به‌صورت مـوازی قـرار گرفتـه اسـت. چرخ‌های ارابه نیز از نوعی انتخاب شـد کـه کـم‌تـرین اصطکاک را بین بلبرینگ‌های خود داشـته باشـد. بـرای تعیین سختی فنر، از این واقعیت استفاده مـی‌گـردد کـه تنش در فنرهای مارپیچ در اثر نیروی F وارد به‌وسیله‌ی دو نیروی برشی و پیچشی ایجـاد شـده در مقطع فنـر تحمل می‌شود. تنش پیچشی چه در حالـت بازشـدن و چه حالت بسته شدن ایجاد می‌شود. مقدار سختی فنر k با استفاده از اصول مکانیک جامدات و قضایای انـرژی قابل محاسبه می‌باشد.



شکل ۳ کاهش تأثیر نسبت جرمی برای مقادیر بالاتر از ٤ درصد



شکل ٤ معیار عملکرد سیستم کنترلی به‌ازای تغییرات متغیرهای سیستم کنترلی

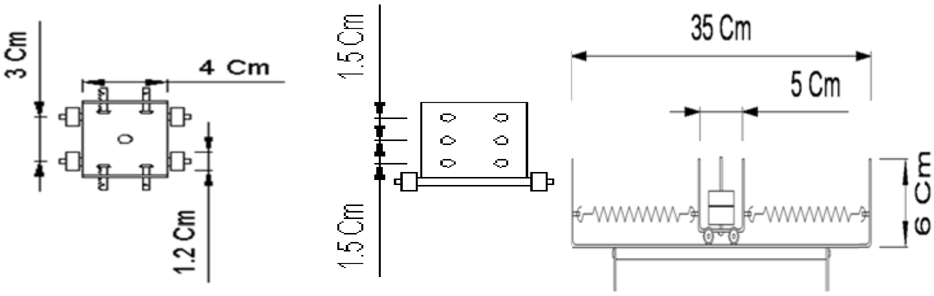
که در نهایت به‌صورت زیر بیان می‌گردد [12]:

$$k = \frac{d^4 G}{8 D^3 N} \qquad (۱۷)$$

که در آن d قطر مفتول، D قطر حلقه‌ی فنر و N تعـداد حلقه‌های فعال در فنر، و G مدول برشی آن مـی‌باشـد. پس از بررسی و مطالعه‌ی حالت‌های مختلف، فنر مورد نیاز انتخاب گردید. بدین ترتیب TMD بـا مشخصـات فوق مطابق شکل (٦) ساخته شد و بر روی سازه (مدل آزمایشگاهی) نصب گردید.

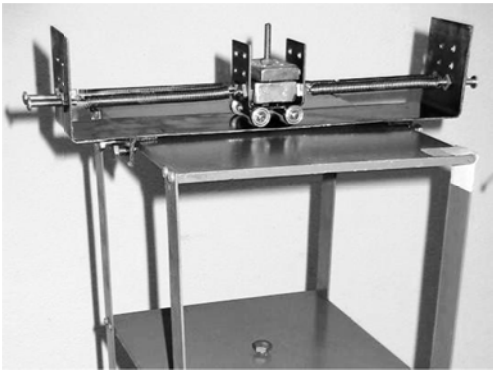
میرایی TMD پس از نصب، به‌کمک ارتعاش آزاد و روش کاهش دامنه اندازه‌گیری شد و مقدار آن برابـر ξ_T =۷/۹۳ درصد به‌دست آمد. با نصب TMD ، با جرم و سختی بهینه شده در مراحـل قبـل، بـر روی سـازه و تکرار مجدد محاسبات تئوریک، میـزان کـاهش پاسـخ تغییرمکان پایدار طبقه‌ی بام در فرکـانس تشـدید سـازه بدون سیستم کنترلی به میزان ۸۸/۷۲ درصـد بـه‌دسـت می‌آید و طبق این محاسبات،مقدار تغییرمکـان حـداکثر طبقه‌ی بام باید از ۲۷/۸۳ میلی‌متـر بـه ۳/۱٤ میلـی‌متـر کاهش یابـد. هـم‌چنـین تـأثیر ایـن سیسـتم در تبـدیل فرکانس تشدید سازه به دو فرکانس، به‌گونه‌ای می‌باشد

که انتظار مـی‌رود فرکـانس سیسـتم مرکـب حاصـل از فرکانس تشـدید ۱۳/۱۵ درصـد دور شـود. شـکل (۷) مقایسه‌ی تحلیلی تغییرات فرکانس و هم‌چنین تاریخچه زمانی پاسخ جابه‌جایی طبقه‌ی بام در حالت تحریک بـا فرکانس تشدید را در دو حالـت کنتـرل شـده وکنتـرل نشده نشان می‌دهد.

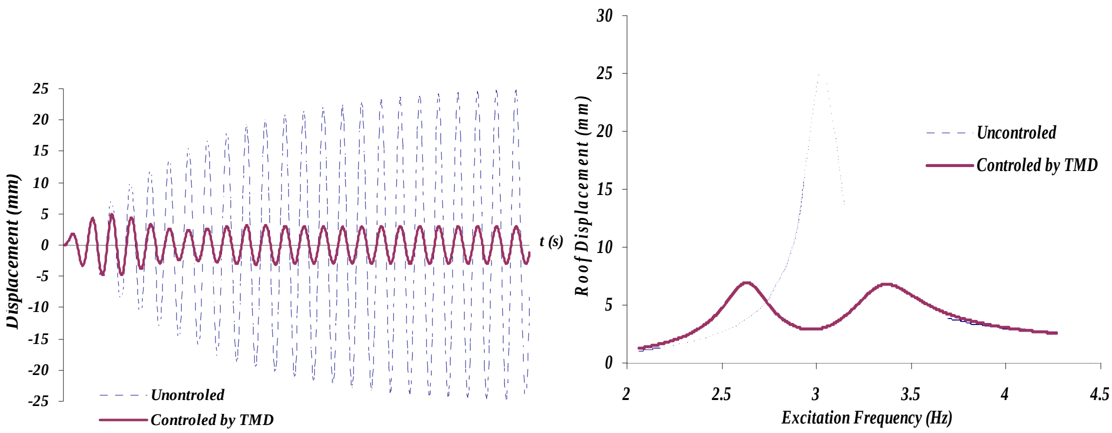


(الف) نمای ارابه TMD و نحوه‌ی قرار گرفتن آن بر روی قاب (ب) نمای ارابه TMD (ج) پلان ارابه

شکل ۵ ارابه TMD و عرصه کف مورد استفاده

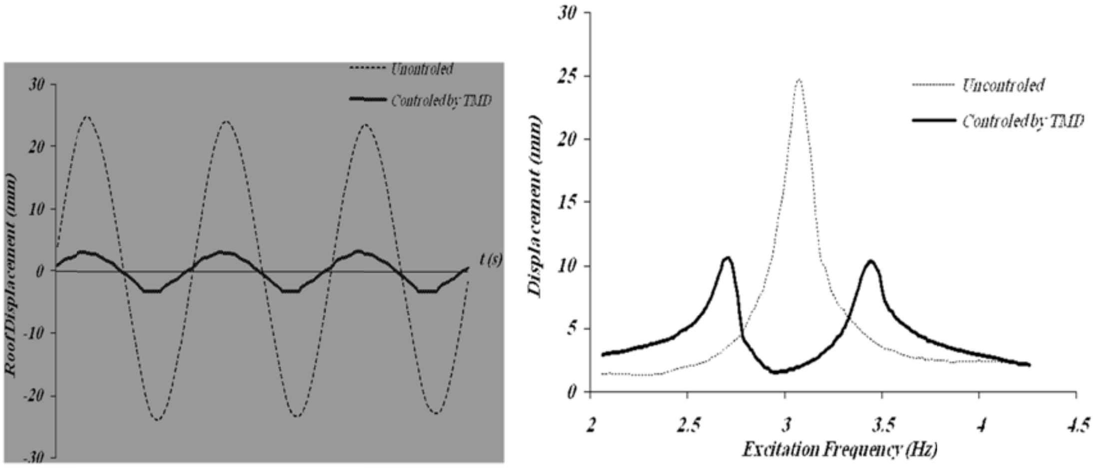


شکل ٦نصب TMD ساخته شده بر روی طبقه‌ی بام مدل



(ب) (الف)

شکل ۷ مقایسه نتایج تحلیلی (الف) تغییرات فرکانسی و (ب) تاریخچه زمانی پاسخ جابه‌جایی طبقه‌ی بام برای TMD بهینه



(ب) (الف)

شکل ۸ مقایسه نتایج آزمایشگاهی (الف) تغییرات فرکانسی و (ب)تاریخچه زمانی پاسخ تغییرمکان طبقه‌ی بام برای TMD نصب شده

نتایج آزمایشگاهی تأثیر سیستم TMD

سیستم TMD ساخته شده بر بام مدل آزمایشگاهی نصب شد، و اقدام به اندازه‌گیری تغییرمکان‌های مدل در اثر ارتعاش پایه‌ی آن گردید.نتایج اندازه‌گیری آزمایشگاهی تغییرمکان‌های سازه پس از نصب TMD نشان می‌دهد که در پاسخ تغییرمکان‌های مدل در طبقه‌ی بام آن (شکل ۸–ب) کاهشی برابر با ۸٦/٦ درصد در حالتی‌که با فرکانس تشدید آن (f_1 = ۳ Hz) تحریک می‌شود، مشاهده می‌گردد که همخوانی بسیار خوبی با نتایج به‌دست آمده از تحلیل را نشان می‌دهد. اثر TMD در تغییر فرکانس مدل نیز در شکل (۸–الف) برای فرکانس‌های تحریک آمده است. همان‌طور که دیده می‌شود سیستم کنترلی توانسته است فرکانس سازه‌ی اصلی را ۱۱/۸۹ درصد از فرکانس تشدید دور کند.

مطالعه‌ی رفتار سیستم TMD طراحی شده در برابر شتاب‌نگاشت‌های زلزله

به‌منظور مطالعه‌ی عملکرد لرزه‌ای سیستم کنترلی TMD طراحی شده که برای تحریک هارمونیک پایه بهینه گردیده است، رفتار دینامیکی مدل آزمایشگاهی فوق تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف مورد بررسی‌تحلیلی قرار گرفت. برای این منظور ۱۱ شتاب‌نگاشت مربوط به زلزله‌های داخلی و ۱۲ شتاب‌نگاشت از زلزله‌های خارجی با محتوای فرکانسی متفاوتانتخاب گردید (جدول ۱). رکوردهای مربوط به شتاب‌نگاشت زلزله‌های خارجی از سایت مؤسسه‌ی تحقیقات لرزه‌ای دانشگاه برکلی [13] و رکوردهای شتاب‌نگاشت زلزله‌های داخلی از سایت مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن [14] برداشت شده‌اند.

در ستون آخر جدول (۱) میزان تأثیر سیستم TMD در کاهش حداکثر پاسخ جابه‌جایی طبقه‌ی بام (R– ۱) تحت اثر هرکدام از این زلزله‌ها آمده است. اما چیزی که کم و بیش در بیش‌تر زلزله‌ها دیده می‌شود، تأثیر مثبت این سیستم در کاهش پاسخ‌ها می‌باشد. به‌طور کلی، مقدار متوسط کاهش پاسخ تغییرمکان طبقه‌ی بام تحت تأثیر ۲۳ زلزله‌ی فوق حدود ۲۵/۳۷٪ می‌باشد.

جدول ۱ مشخصاتشتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده به‌همراه میزان کاهش پاسخ جابه‌جایی حداکثر طبقه‌ی بام

EQ. No.	نام زلزله	ایستگاه	تاریخ وقوع	مولفه	PGA*g	۱- R (٪)
۱	Chi-Chi	WNT	1999-9-20	E-W	۰/۷۵	۲۰/۸٤
۲	Coalinga	Oil City	1983-7-22	N-S	۰/۷۲	٤۲/۷۸
۳	Duzce	Bolu	1999-11-12	E-W	۰/۷۷	۳۳/۵۹
٤	El-Centro	Irrigation Distriot	1940-5-19	N-S	۰/۳۵	۱۸/۰۹
۵	Hachinohe	Takochi-Oki	1968-5-16	N-S	۰/۲۳	۲۷/٦٦
٦	Superstition	Superstition Mtn Camera	1987-11-24	N-S	۰/۷۹	۳۷/۳۱
۷	Kobe	KJMA	1995-1-16	N-S	۰/۸۲	۳۹/۸۸
۸	Parkfield	Cholam Shandon	1966-6-28	N-S	۰/۳۸	٤۰/۳۸
۹	Nahanni	Site 1	1985-12-23	N-S	۱/۰٦	۵۱/٦٦
۱۰	Northridge	Sylmar County Hospital	1994-1-17	N-S	۰/۸٤	۳۱/۰۷
۱۱	Morgan Hill	Coyote Lake Dam	1984-4-24	N-S	۰/۹۷	−٤/۹٦
۱۲	Loma Prieta	LGPC	1989-10-18	N-S	۰/۷۸	۲٤/۲۰
۱۳	اردکول	بسک آباد	۱۳۷٦/۲/۲۰	L	۰/۱۳	۱۹/۸۲
۱٤	بم	بم	۱۳۸۵/۱۰/۵	L	۰/۸۱	۳۵/۵٦
۱۵	پل آبگینه	ده بالا	۱۳۷۸/۸/۹	L	۰/۰٦	−۱۵/۸۹
۱٦	منجیل	آب بر	۱۳٦۹/۳/۳۰	L	۰/٦٤	۳٤/٦۹
۱۷	زنجیران	زنجیران	۱۳۷۳/۳/۳۰	L	۰/۹۲	۲۸/۹۳
۱۸	سرعین	کریق	۱۳۷۵/۱۲/۱۰	L	۰/٦۳	−۵/٦۵
۱۹	صالح آباد	صالح آباد	۱۳۷۸/۸/۱۸	L	۰/۳٤	−۳۵/۳٦
۲۰	طبس	طبس	۱۳۵۷/٦/۲۵	L	۰/۸٤	۱۲/۳۷
۲۱	کره بس	بالا ده	۱۳۷۸/۲/۱۷	L	۰/۲۹	۵۲/۱۳
۲۲	گرم خان	آشخانه	۱۳۷۵/۱۱/۱٦	L	۰/۱۱	۳۸/٤٤
۲۳	ناقان	ناقان	۱۳۵٦/۱/۱۷	L	۰/۹۱	۲٦/۲۱

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، عملکرد سیستم کنترل غیر فعال TMD به‌صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور، یک مدل آزمایشگاهی به‌صورت یک قاب فلزی سه‌بعدی چهار طبقه با مقیاس ۱:۱۲ ساخته شد و مشخصات دینامیکی آن هم به‌صورت تحلیلی و هم به‌صورت آزمایشگاهی و با استفاده از تعدادی آزمایش‌های استاتیکی تعیین گردید. سپس، سیستم کنترل TMD که شامل یک جرم، فنر و میراگر می‌باشد به‌گونه‌ای طراحی گردید که بتواند پاسخ‌های مدل را تحت تحریکات هارمونیک پایه کاهش دهد.پس از بهینه‌یابی پارامترهای طراحی برای جرم همساز، براساس تحریک هارمونیک پایه و جهت کنترل و کاهش تغییرمکان حداکثر طبقه‌ی بام، TMDطراحی شده ساخته و بر روی مدل نصب گردید و پاسخ‌های اندازه‌گیری شده تحت تحریک هارمونیک پایه بر روی میز لرزه با نتایج حاصل از تحلیل مقایسه گردید. علاوه بر مطالعه‌ی عملکرد سیستم TMD در برابر تحریکات هارمونیک پایه، عملکرد این سیستم در برابر ۲۳ شتاب‌نگاشت زلزله‌های مختلف نیز به‌صورت تحلیلی

مورد مطالعه قرار گرفت. از مطالعات صورت گرفته در این تحقیق نتایجی حاصل شد که خلاصه‌ی آن به شرح زیر می‌باشد:

۱- با افزایش جرم TMD و ثابت نگهداشتن دیگر متغیرهای این سیستم، کاهش بیشتری در پاسخ جابه‌جایی طبقه‌ی بام مشاهده گردید که علت آنرا می‌توان در افزایش اثر جرم همساز در دور نمودن سازه از فرکانس تشدید دانست.

۲- استفاده از میراگر جرم همساز (سیستم TMD) برای کنترل ارتعاشاتی که دارای یک فرکانس غالب در نزدیکی فرکانس اصلی سازه می‌باشند، نتایج بسیار مطلوبی را به‌دست می‌دهد. به‌طوری‌که پاسخ سازه برای تحریک هارمونیک با فرکانسی برابر فرکانس اصلی مدل را می‌تواند تا ۸۶/۶٪ کاهش دهد که البته نتایج تحلیل کاهش ۸۸/۷۲٪ را پیش‌بینی می‌نمود. این نتایج برای توان دور کردن فرکانس تشدید سازه از فرکانس تحریک ۱۱/۸۹٪ بود که در حالت تئوری مقدار آن ۱۳/۱۵٪ تعیین شده بود.

۳- کارآیی سیستم کنترلی TMD در کاهش پاسخ سازه در برابر تحریکات زلزله بستگی بسیار زیادی به محتوای فرکانسی و سایر مشخصات زلزله‌ای دارد که مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌طوری‌که عملکرد آن در کاهش پاسخ‌ها بسیار متغیر می‌باشد و می‌تواند از کاهش پاسخ ۵۲/۱۳ درصدی در زلزله‌های بم کرمان و کره‌بس فارس تا تأثیر منفی در کاهش پاسخ و افزایش ۳۵/۳۶ درصدی پاسخ در زلزله صالح آباد خراسان متغیر باشد. ولی این سیستم قادر است پاسخ مدل مورد نظر را در برابر ۲۳ زلزله‌ی مورد مطالعه به‌طور متوسط ۲۵٪ کاهش دهد.

مراجع

1. Datta, T.K., "Control of Dynamic Response of Structures, Symposium on Emerging Trends in Vibration and Noise", Engg, pp. 18-20, (1996).
2. Constantinou, M.C., Soong, T.T., Dargush, G.F., "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering", John Wiley & Sons, New York, (1997).
3. Villaverde, R., "Reduction in SeismicRresponse with Heavily-Damped Vibration Absorbers", Earthquake Engineering andStructural dynamics, Vol. 13 ,pp. 33-42, (1985).
4. Villaverde, R., "Seismic Control of Structures with Damped Resonant Appendages", Proc.*of 1st world conf.on structural control,* Los Angeles, California, USA, pp 113-119, (1994).
5. Martin, S.C., Villaverde, R., Passive, "Seismic Control of Cable-Stayed Bridges with Damped Resonant Appendages", Earthquake Eng. & Structuraldyn., Vol. 24, pp. 233-246, (1995).
6. Koyama, L.A., Villaverde, R., "Damped Resonant Appendages to Increase Inherent Damping in Buildings", Earthquake Engineering andStructural dynamics, Vol. 22, pp. 491-507, (1993).
7. Pinkaew, T., Lukkunaprasit, P., Chatupote, P., "Seismic Effectiveness of TMDs for Damage Reduction of Structures", Engineering Structures, Vol. 25, pp. 39-46, (2003).
8. Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W., Chung, R.M., "A method of Estimating the Parameters of TMDs for Seismic Application", Earthquake Engineering and Structural dynamics, Vol. 26, pp. 617-

635, (1997).

9. Clough, R., Penzin, J., "Dynamics of Structures", 2^{nd}ed., McGraw-Hill, (1993).

10. Ogata, K., Modern, "Control Engineering", Engle wood Cliffs, Prentice-Hall, (1982).

۱۱. اکبری آقبلاغ، م.، پورزینلی، س.، فلاح، ن.، "بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی استفاده از سیستم کنترلیTMD جهت کنترل ارتعاشات ساختمان‌ها در برابر زلزله"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه گیلان، (۱۳۸٦).

12. Shigley, J. E., Mischke, C.R., "Mechanical Engineering Design", McGraw-Hill, (1992).

13. http://Peer.Berekeley.edu/NGA/Earthquaks.html.

14. http://www.BHRC.ir.